

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET**

**JELENA POTISK**

**ISPITIVANJE PLVC MODELA  
KARAKTERIZACIJE BOJA NA  
ZASLONIMA UREĐAJA PRI VISOKOJ  
OSVIJETLJENOSTI**

**DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, 2016



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

**JELENA POTISK**

**ISPITIVANJE PLVC MODELA  
KARAKTERIZACIJE BOJA NA  
ZASLONIMA UREĐAJA PRI VISOKOJ  
OSVIJETLJENOSTI**

**DIPLOMSKI RAD**

Mentor:  
dr. sc. Ante Poljićak

Student:  
Jelena Potisk

Zagreb, 2016

## SAŽETAK

Kolorimetrija je dio znanosti koji boje opisuje kvantitativno. Karakterizacija boja služi za definiranje transformacije između prostora boja uređaja (RGB i CMYK) opisujući percipiranu boju, na temelju CIE standardnog promatrača (CIE XYZ i CIE LAB). Modeli za karakterizaciju boja zaslona koji se ispituju u ovome radu su PLVC, PLCC i PLCC\* s crnom korekcijom. Za mjerenje se koriste uređaji Samsung Galaxy SIII, iPhone 4 i iPad 4 pri visokoj svjetlini zaslona, a boje prikazivane na zaslonima mjerene su s kolorimetrom Konica Minolta CS-200. Pretpostavljeno je da će PLVC model dati najbolje rezultate za LCD tehnologije zaslona, u odnosu na PLCC i PLCC\* model s crnom korekcijom. Izračunima je vidljivo kako PLVC model daje najbolje rezultate za LCD tehnologiju zaslona, ne i za AMOLED tehnologiju zaslona, dok PLCC i PLCC\* model s crnom korekcijom prikazuju odstupanja veća od očekivanog.

Ključne riječi: *kolorimetrija, karakterizacija boja, PLVC, PLCC, PLCC\**

## SUMMARY

Colorimetry is part of the science that describes the color quantity. Characterization of color defines the transformation between color space (RGB and CMYK) describing the perceived color, based on the CIE standard observer (CIE XYZ and CIE LAB). Models to characterize the color screen to be tested in this paper are PLVC, PLCC and PLCC \* with black correction. Used devices for measurement are Samsung Galaxy SIII, iPhone 4 and iPad 4 with high brightness display, and the colors displayed on the display of device were measured using a colorimeter Konica Minolta CS-200. It is assumed that PLVC model provide the best results for LCD display technology, compared to PLCC and PLCC \* model with black correction. Calculation shows that PLVC model gives the best results for LCD screen technology, but not for the AMOLED screen technology and PLCC and PLCC \* model with black correction display deviations greater than expected.

Key words: *colorimetry, color characterization, PLVC, PLCC, PLCC\**

## SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. Općenito o kolorimetriji .....	2
2.1.1. Terminologija i specifikacija boja.....	2
2.1.2. Sustav aditivnog miješanja boja .....	3
2.2. CIE standardni kolorimetrijski sustav .....	4
2.2.1. RGB sustav specifikacije boja.....	5
2.2.2. Konverzija u XYZ sustav specifikacije boja .....	7
2.2.3. CIE $L^*a^*b^*$ .....	12
2.3. Metode mjerenja kolorimetrijskih vrijednosti .....	14
2.3.1. Izravna mjerenja tropodražajnih vrijednosti.....	14
2.3.2. Spektralna kolorimetrija.....	16
2.4. Upravljanje bojama .....	17
2.5. PLVC model u ispitivanju karakterizacije boje zaslona .....	18
2.6. PLCC model u ispitivanju karakterizacije boje zaslona .....	20
2.7. Standardi mjerenja zaslona .....	21
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	22
3.1. Materijali .....	22
3.1.1. Apple iPhone 4.....	22
3.1.2. Samsung Galaxy SIII .....	22
3.1.3. Apple iPad 4.....	23
3.2. Instrumenti .....	23
3.2.1. Kolorimetar Konica Minolta CS-200 .....	23
3.3. Metode .....	24
4. REZULTATI I RASPRAVA .....	25
5. ZAKLJUČCI.....	32
6. LITERATURA.....	33

## 1. UVOD

Kolorimetrija je grana znanosti o bojama koja se bavi kvantifikacijom boje. Za opisivanje ponašanja različitih izlaznih uređaja (npr. zaslona), mora se usporediti mjereno u odnosu na standardne prostore boja. Instrumenti koji se koriste za mjerenje prikaza boje uređaja uključuju kolorimetre i spektrofotometre.

Karakterizacija boja zaslona uređaja jedan je od glavnih problema za precizno renderiranje boja sadržaja koje se prikazuju na zaslonu uređaja. Karakterizacija ima svrhu definirati transformaciju između prostora boja uređaja, obično RGB i CMYK prostora boja, opisujući percipiranu boju, na temelju CIE standardnog promatrača, obično CIE XYZ i CIE LAB.

U ovom diplomskom radu kao model za karakterizaciju boja zaslona uređaja koristiti će se PLVC model (*Piecewise Linear Model Assuming Variation in Chromaticity*) za tehnologije zaslona koji se trenutno koriste kao što su LCD (*Liquid Crystal Displays*) , IPS (*In-plane switching*) , LED (*Light-emitting diode*) i slično. PLVC model ispitivati će se pri visokoj osvjetljenosti zaslona. Uz PLVC model ispitati će se i učinak PLCC modela (*Piecewise Linear assuming Chromaticity Constancy*) te PLCC\* modela s crnom korekcijom, koji pretpostavljaju da je kromatičnost konstantna te koji se pokazuje točniji za CRT (*Cathod-Ray Tube*) tehnologije zaslona.

Pretpostavlja se da će PLVC model pokazati bolje rezultate u odnosu na PLCC model i PLCC\* model s crnom korekcijom za LCD tehnologije zaslona pri visokoj osvjetljenosti zaslona uređaja.

## **2. TEORIJSKI DIO**

### **2.1. Općenito o kolorimetriji**

Kolorimetrija je grana znanosti koja se bavi kvantificiranjem boja fizički definiranog vizualnog podražaja na takav način da:

- a) kada se gleda od strane promatrača s normalnim vidom, pod istim uvjetima promatranje, podražaji s istim specifikacijama izgledaju podjednako
- b) podražaji koji su podjednaki imaju iste specifikacije
- c) brojevi koji sadrže specifikaciju su kontinuirane funkcije fizikalnih parametara koji definiraju raspodjelu snage spektralnog zračenja podražaja [1]

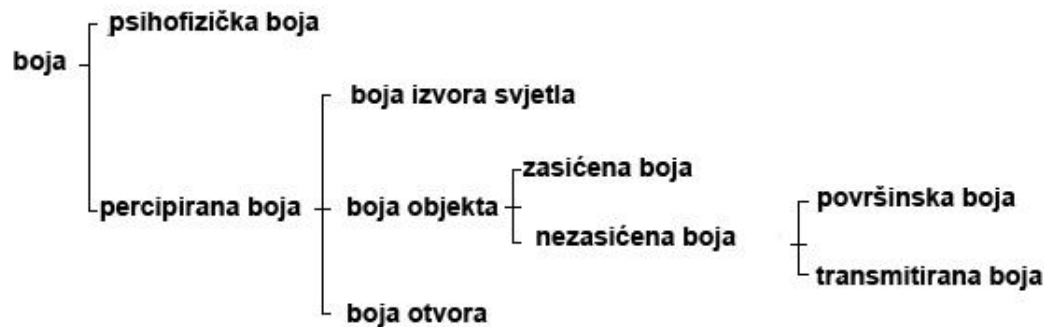
Eksperimentalni zakoni usklađivanja boja koji se nazivaju trikromatskom generalizacijom, osiguravaju temelj za bilo kakve kolorimetrijske sustave koji ispunjavaju te uvjete. Pojmovi i izrazi trenutno upotrebljeni u kolorimetriji su u velikoj mjeri povezani s trikromatskom generalizacijom. Kolorimetrija se također bavi specifikacijom malih razlika u bojama da promatrač može opaziti kad su razlike u raspodjeli snage spektralnog zračenja zadanih vizualnih podražaja takve da potpuna usklađivanje boja nije zapažena.

Za ovu svrhu, koristi se formula kolorimetrijske razlike, koja je u današnjoj kolorimetrijskoj praksi izvedena od niza različitih blokova eksperimentalnih podataka. CIE kolorimetrijski sustav obuhvaća bitne standarde i postupke mjerenja koje su potrebne da bi znanost o bojama bila koristan alat u području znanosti i tehnologije.

#### **2.1.1. Terminologija i specifikacija boja**

Specifikacija boja je izražavanje boje kvantitativno te se kvantitativne vrijednosti definiraju kao vrijednosti specifikacije boje. Sustav specifikacija boja koji sadrži niz definicija se zapravo zove sustav boja. Sustavi boja uključuju sustave boja koji se temelje na percepciji boja pod određenim uvjetima („sustav pojavnosti boje“) te sustava koji se temelje na količini aditivnog obojenog svjetla

potrebnog da bi se boja podudarala s testnom bojom u eksperimentu usklađivanja boja („sustav usklađivanja boja“) [1,2].



Slika 1. Klasifikacija boje

### 2.1.2. Sustav aditivnog miješanja boja

Eksperimentalni zakoni usklađivanja boja su sažeti u trikromatskoj generalizaciji. Navodi se da se u širokom rasponu uvjeta promatranja, mnogi podražaji boja mogu podudarati u boji potpuno pomoću aditivnog miješanja triju fiksnih primarnih podražaja čije su energije zračenja odgovarajuće prilagođene. [1]. Eksperimenti pokazuju da u određenim granicama bilo koja željena boja može biti sintetizirana miješanjem crvenog  $[R]$ , zelenog  $[G]$  i plavog  $[B]$  svjetla u ispravnom omjeru. Usklađivanje boja je proces miješanja podražaja  $[R]$ ,  $[G]$  i  $[B]$  te kontroliranja njihovih intenziteta na način da kombinacija svjetla odgovara testom svjetlu [1,2].

Osnovni principi aditivnog miješanja definirani su Grassmanovim zakonima:

1. Za specifikaciju neke boje potrebne su tri i samo tri neovisna primara.
2. Proporcionalnost - usklađenost dva podražaja će i dalje vrijediti ako se intenzitet oba podražaja pomnoži sa nekim faktorom.
3. Aditivnost - promjenom udjela jedne od komponenti aditivnog miješanja, sukladno se mijenja i rezultat aditivnog miješanja.

Prvi zakon kaže da se bilo koji podražaj boje može prikazati kao linearna kombinacija točno tri neovisna primara, dakle takva da se niti jedan od primara ne može uskladiti s kombinacijom ostala dva.

$$[C_\lambda] \equiv r[R] + g[G] + b[B] \quad (1)$$

Gdje je  $C_\lambda$  svjetlost valne duljine  $\lambda$ ,  $[R]$ ,  $[G]$ ,  $[B]$  su tri neovisna primara, te  $r$ ,  $g$ ,  $b$  su udjeli (intenziteti) primara. Uglata zagrada  $[ ]$  označava podražaj koji osjeća promatrač. Treba imati na umu da ovo nije prava algebarska jednadžba te da trostruka jednakost ovdje zapravo označava da lijeva i desna strana jednadžbe izazivaju isti osjet kod promatrača.

Drugi zakon kaže da će se pri promjeni intenziteta svjetlosti valne duljine valne duljine  $C_\lambda$  za neki faktor  $\alpha$  za isti faktor promijeniti i potrebni intenziteti primara:

$$\alpha[C_\lambda] \equiv \alpha r[R] + \alpha g[G] + \alpha b[B] \quad (2)$$

Treći zakon govori da za bilo koja dva podražaja  $C_{\lambda 1}$  i  $C_{\lambda 2}$  izjednačene sa kombinacijom primara:

$$[C_{\lambda 1}] \equiv r_1(R) + g_1(G) + b_1(B) \quad (3)$$

$$[C_{\lambda 2}] \equiv r_2(R) + g_2(G) + b_2(B)$$

Ukupni podražaj  $C$  dobije se zbrajanjem intenziteta primara potrebnih za izjednačavanje dva podražaja  $C_{\lambda 1}$  i  $C_{\lambda 2}$ :

$$[C] \equiv [C_{\lambda 1}] + [C_{\lambda 2}] \equiv (r_1 + r_2)[R] + (g_1 + g_2)[G] + (b_1 + b_2)[B] \quad (4)$$

## 2.2. CIE standardni kolorimetrijski sustav

Postoje dvije vrste specifikacija boje sustava. Jedan od njih, Munsell sustav, temelji se na izgledu boje. S druge strane, CIE sustav, temelji se na aditivnom miješanju boja. Munsellov sustav boja može se shvatiti intuitivno, jer stvarni sastav boja oblikuje temelj sustava.

Međutim, potrebne su dodatne operacije kao što su interpolacija ili ekstrapolacija za specifikaciju proizvoljne boje te su rezultati (pri korištenju



Munsellovog sustava) relativno niske preciznosti. S druge strane, visoka preciznost se može primijeniti na CIE sustavu pomoću spektrofotometrijske kolorimetrije i boja može biti precizno specificirana za bilo koji proizvoljan podražaj boje. Prema tome, CIE sustav obično se koristi u industrijskim i drugim kvantitativnim primjenama. [2]

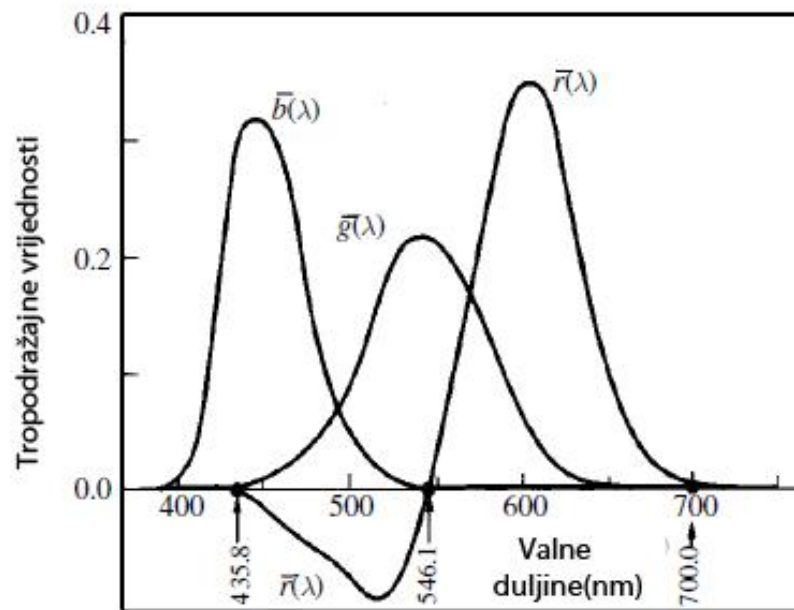
### 2.2.1. RGB sustav specifikacije boja

U sustavu miješanja boja, nakon što su funkcije usklađivanja boja utvrđene, tropodražajna specifikacija za bilo koji proizvoljni podražaj boja može se lako odrediti. No potrebna je standardizacija za usporedbu rezultata, jer funkcije usklađenosti boja ovise o osnovnim i referentnih podražajima. U skladu s tim, *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) uspostavila je standarde funkcija usklađivanja boja 1931. godine te se temelji na sljedećim načelima [2,3]:

1. Referentni podražaji, primari [R], [G] i [B] su monokromatska svjetla valnih duljina  $\lambda_R = 700.0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546.1 \text{ nm}$  i  $\lambda_B = 435.8 \text{ nm}$
2. Osnovni podražaj je podražaj bijele boje. Iznosi referentnih podražaja, [R], [G] i [B] moraju odgovarati osnovnom podražaju u omjeru 1.0000: 4.5907: 0.0601 kad se iskazuje u fotometrijskim jedinicama (lumen, lm), a 72.0966: 1.3791: 1.0000 kad se iskazuje u radiometrijskim jedinicama (Watt, W).

Prije objavljivanja CIE kolorimetrijskog sustava, dvije odvojene grupe znanstvenika, Wrightova 1929. i Guildova 1931. provode eksperimente da bi odredili funkcije za usklađivanje boja. Dvije grupe znanstvenika su koristili različite primare pa su i funkcije za usklađivanje boja bile različite. Stvarne tropodražajne vrijednosti određene za neki podražaj su proizvoljne po tome da će biti različite ukoliko se koriste različiti primari. Uvjet usklađivanja je valjan bez obzira koji primari su odabrani pod uvjetom da su zadovoljeni neki uvjeti (na primjer, primari moraju biti nezavisni, odnosno, ne smije biti moguće uskladiti jedan od primara aditivnom kombinacijom druga dva primara).

Ovo znači da ukoliko dva podražaja izgledaju isto i određeni su istim tropodražajnim vrijednostima definiranih Guild-ovim sustavom, ti podražaji će imati iste tropodražajne vrijednosti definirane Wright-ovim sistemom te će ta dva podražaja imati iste tropodražajne vrijednosti pod bilo kojim drugim sistemom bez obzira na odabir primara.



Slika 2. Funkcije usklađivanja boja CIE 1931 sustava specifikacije boja

Funkcije usklađivanja boja su količine referentnih podražaja  $[R]$ ,  $[G]$  i  $[B]$  koji trebaju odgovarati monokromatskim podražajima svake valne duljine. No kao što je prikazano na slici 2, funkcije usklađivanja boja uključuju negativni dio. Negativna vrijednost znači da je potreban negativni iznos referentnog podražaja za usklađenost. To se događa zbog sljedećih činjenica, iako promatrač može probati razne načine za miješanje triju referentnih podražaja, smatrati će da je nemoguće uskladiti bilo koji monokromatski svjetlosni podražaj  $[F]$  koristeći monokromatske referentne podražaje  $[R]$ ,  $[G]$  i  $[B]$  zato jer je testni podražaj uvijek prezasićen, osim u trivijalnim slučajevima gdje je testni podražaj identičan referentnom podražaju.

Zato se u praktičnom eksperimentu usklađivanja boja, zasićenost probnog podražaja  $[F]$  smanjuje primjerice miješanjem s određenom količinom  $[R]$  podražaja, te se onda usklađuje aditivna kombinacija  $[G]$  i  $[B]$  podražaja. Jednadžba je u ovom slučaju opisana na sljedeći način:

$$[F_\lambda] + R[R] \equiv G[G] + B[B] \quad (5)$$

Pretpostavljajući da Grassmannovi zakoni vrijede, jednadžba može biti transformirana na sljedeći način:

$$[F_\lambda] \equiv -R[R] + G[G] + B[B] \quad (6)$$

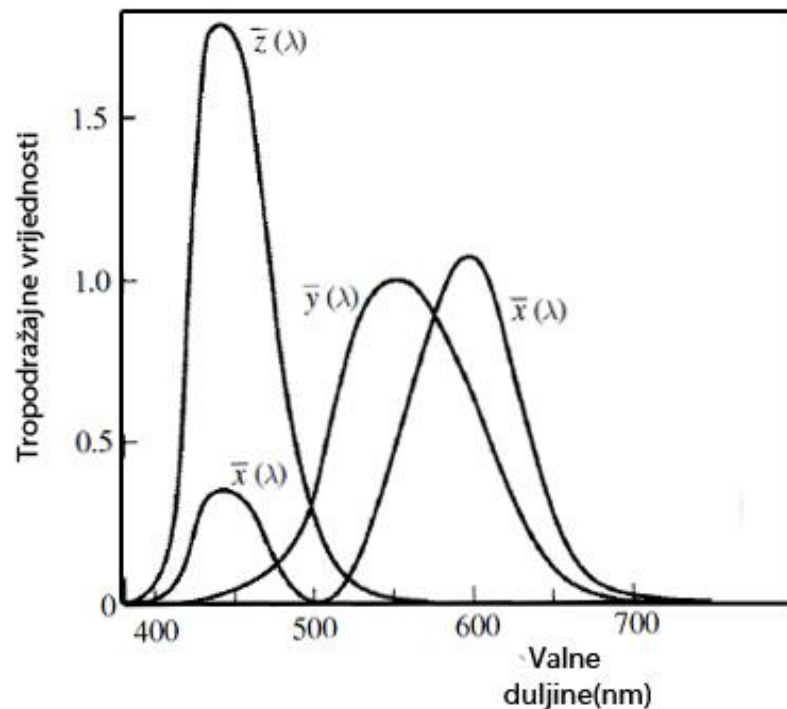
Dakle, prvi izraz  $-R$  je negativan, i to je razlog zašto je dobivena djelomično negativna funkcija usklađivanja boja. Ova jednadžba boja može se smatrati kao jednadžba vektora u trodimenzionalnom prostoru uzimanjem  $[R]$ ,  $[G]$  i  $[B]$  vrijednosti kao vektorskim komponentama. Trodimenzionalni prostor izgrađen na takav način se koristi za geometrijski prikaz boja i naziva se prostor boja.

### 2.2.2. Konverzija u XYZ sustav specifikacije boja

Moguće je konvertirati tropodražajne vrijednosti jednog sistema u drugi jednostavnom linearnom transformacijom. Moguće je izračunati i funkcije usklađivanja boja za jednu kombinaciju primara ukoliko su dane funkcije usklađivanja boja za drugu kombinaciju primara. Stoga 1931. godine CIE, koristeći kombinacije primara koje je koristio Wright i one koje je koristio Guild, definira standardne funkcije za usklađivanje boja, te su potvrdili da postoji dobro slaganje između Wrightovih i Guildovih mjerenja.

CIE sustav kakav danas znamo je baziran na originalnim Wrightovim i Guildovim funkcijama za usklađivanje boja koje su transformirane u primare označene s  $X$ ,  $Y$  i  $Z$ . Funkcije usklađivanja boje poznate su za pojedine valne duljine i označene sa  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ . CIE je također definirala standardne vrste

svjetla, odnosno tablice distribucije intenziteta izvora svjetla koje se koriste kod izračuna tropodražajnih vrijednosti za površinu poznatog spektralnog faktora refleksije (spektrofotometrijska krivulja).



Slika 3. Funkcije usklađivanja boja  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  i  $\bar{z}$  u CIE 1931 XYZ sustavu specifikacije boja

Uvođenje vrste svjetla omogućuju određivanje tropodražajnih vrijednosti za reflektirajuće površine, ali i za emitivne podražaje. Praktična jednadžba za određivanje CIE 1931 tropodražajnih vrijednosti za površinu spektralne refleksije  $P(\lambda)$  gledanu pod izvorom svjetla koje ima distribuciju intenziteta  $E(\lambda)$  je:

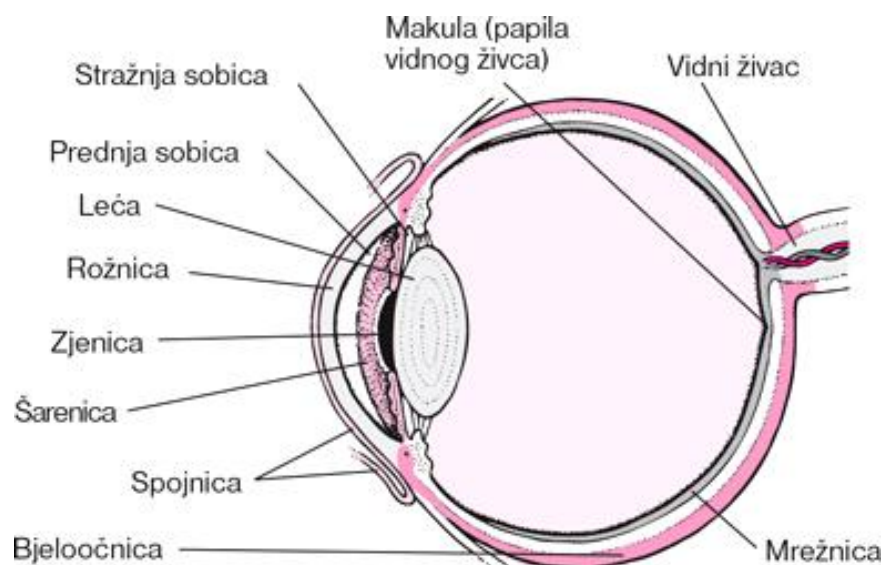
$$\begin{aligned} X &= k \sum E(\lambda)P(\lambda) \bar{x}(\lambda) \\ Y &= k \sum E(\lambda)P(\lambda) \bar{y}(\lambda) \\ Z &= k \sum E(\lambda)P(\lambda) \bar{z}(\lambda) \end{aligned} \quad (7)$$

gdje je

$$k = \frac{100}{\sum E(\lambda)P(\lambda)}$$

Pri svakoj valnoj duljini produkt  $E(\lambda)P(\lambda)$  daje količinu energije koju sadrži podražaj (boja promatrane površine) za valnu duljinu  $\lambda$ . Ovaj produkt sa množi funkcijom za usklađivanje boje za istu valnu duljinu  $\lambda$ . Sumiranjem produkata po svim valnim duljinama dobiva se količina primara potrebna za postizanje podražaja. Normalizirajući faktor  $k$  implicira da nije potrebno znati apsolutnu spektralnu distribuciju izvora svjetla, tako da je (bar za refleksne uzorke)  $Y=100$  za savršeno bijelo polje (za koje je  $P(\lambda)=1$  za svaku valnu duljinu).

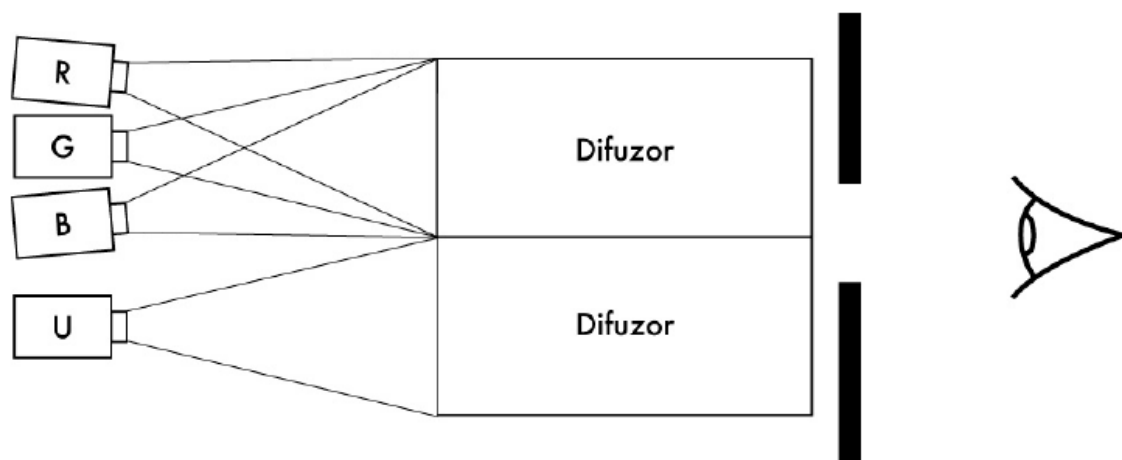
CIE je definirao dvije funkcije za usklađivanje boja, na temelju standardnog promatrača, prvi je bio CIE 1931 standardni kolorimetrijski promatrač, a drugi je bio CIE 1964 dopunski standardni kolorimetrijski promatrač. Razlika se temelji na vidnom polju koje se koristi u prikupljanju eksperimentalnih podataka.



Slika 4. Građa oka

CIE (1931) funkcije za usklađivanje boja su izvedene iz eksperimenata koje su koristile bipartitni kolorimetar s poljem koje na mrežnici oka pokriva vizualni kut od  $2^\circ$ . Vizualni kut od  $2^\circ$  koristi se zbog toga da bi se nagnalo sliku

na foveu oka standardnog promatrača. Fovea se nalazi u središtu makule (žute pjege), to je plitka udubina koja sadrži gustu koncentraciju čunjića (receptori boje), ali ne i štapića. Kod bipartitnog kolorimetra promatrač gleda bipartitno polje (polje podijeljeno na dva dijela). Na jednom dijelu polja prikazan je svjetlosni podražaj, a u drugom dijelu polja je prikazana aditivna kombinacija primara. Promatrač podešava intenzitet svakog od tri primara dok promatrač nije u stanju razlučiti dva polja. Kada se ujednačenost polja postigne očitaju se tropodražajne vrijednosti s kolorimetra.



*Slika 5. Shematski prikaz bipartitnog kolorimetra*

1964. godine su mjerene nove funkcije za usklađivanje korištenjem većeg ( $10^\circ$ ) polja. Iako su funkcije za usklađivanje boja iz 1931. i 1964. koristile iste XYZ primare pokazale su neke značajne razlike. Jedan razlog za ovo je distribucija čunjića (foto osjetljivih stanica) u oku. Na primjer, poznato je da centralna regija mrežnice - žuta točka ne sadrži čunjiće osjetljive na kraće valne duljine vidljivog dijela spektra.

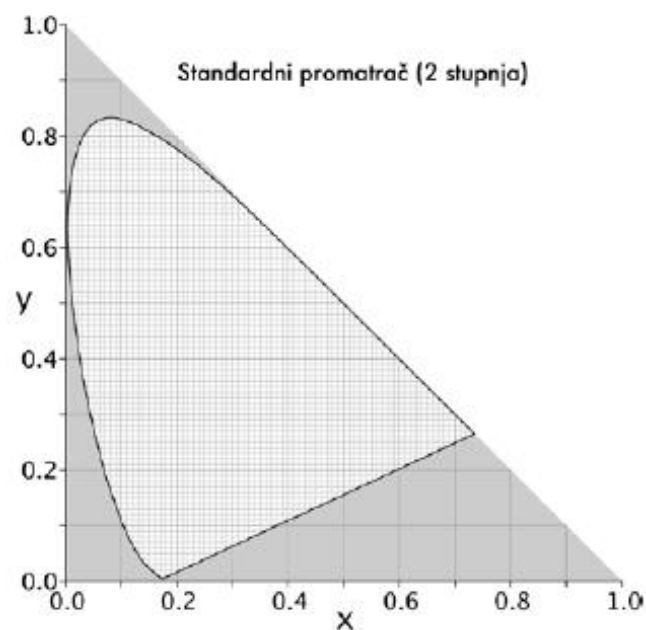
Ova dva seta funkcija za usklađivanje boja su dobro služili industriju posljednjih 70 godina. Međutim, u konačnici predstavljaju problem jer korisnici moraju ovisno o primjeni odlučiti koje funkcije koristiti. Također ponekad veličina

polja podražaja nije uvijek 2° ili 10°. CIE trenutno radi prema razvoju funkcija koje kontinuirano variraju ovisno o veličini polja podražaja.

CIE XYZ tropodražajne vrijednosti specificiraju podražaj boje onako kako ga ljudsko oko vidi. Međutim, ponekad je korisnije izračunati koordinate kromatičnosti  $x$  i  $y$ :

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\y &= \frac{Y}{X+Y+Z}\end{aligned}\tag{8}$$

Pomoću koordinata kromatičnosti moguće je ucrtati boju u  $xy$  dijagram kromatičnosti boja koji omogućuje dobru vizualizaciju prostora boja. Ipak, treba imati na umu da boje iste kromatičnosti ali različite svjetline zauzimaju isto mjesto na dijagramu.



*Slika 6. CIE  $x,y$  dijagram kromatičnosti*

Jedna od prednosti dijagrama kromatičnosti je u tome što se, prema Grassmanovom zakonu, aditivna kombinacija dvaju primara nalazi na liniji koja spaja točke koje predstavljaju kromatičnost ta dva primara. Ukoliko se koriste tri

primara, gamut aditivnog sistema je dan trokutom koji nastaje spajanjem kromatičnosti tri primara.

Gamut svih boja koje se mogu ostvariti u prirodi sadržan je unutar linije oblika potkove i ravne linije koja spaja krajeve potkove.

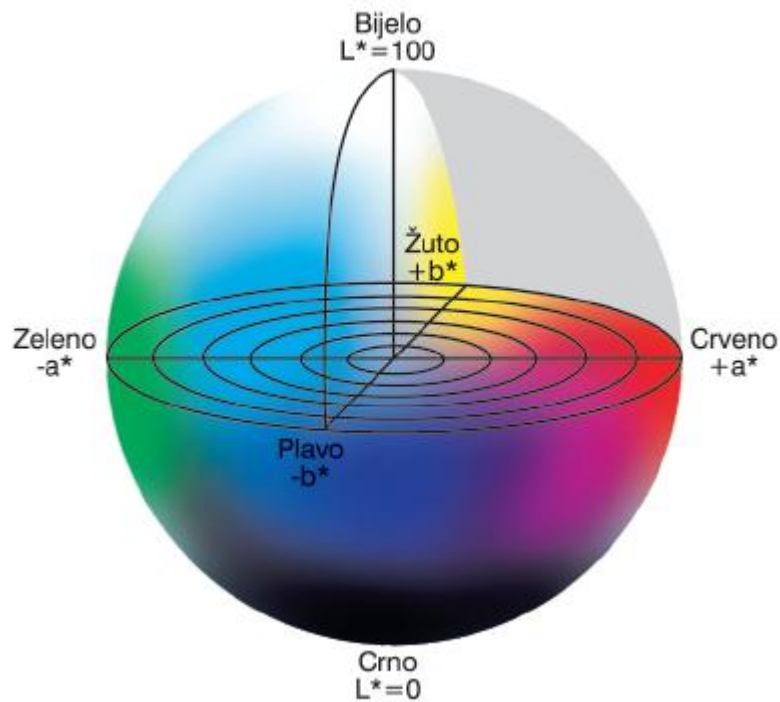
### 2.2.3. CIE $L^*a^*b^*$

CIE je napravila značajan napredak 1976. sa uvođenjem CIE  $L^*a^*b^*$  specifikacije boja. Ovaj prostor je ostvaren nelinearnom transformacijom XYZ prostora. Transformacija tropodražajnih vrijednosti u  $L^*a^*b^*$  koordinate dana je izrazima:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \\ b^* &= 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

CIE  $L^*a^*b^*$  predstavlja trodimenzionalni prostor boja gdje  $a^*$  i  $b^*$  osi tvore ravninu, a  $L^*$  os je linija okomita na tu ravninu, a  $X_n$ ,  $Y_n$  i  $Z_n$  su tropodražajne vrijednosti za korišten izvor svjetla. CIE  $L^*a^*b^*$  u grubo opisuje model ljudskog vida (teorija suprotnih procesa) gdje vizualni sustav na razini mrežnice obrađuje informaciju o svjetlini ( $L^*$ ) te dvije informacije o kromatičnosti, crveno-zeleno ( $a^*$ ) i žuto-plavo ( $b^*$ ), normalizacija ovisna o korištenom izvoru svjetla omogućava da ovaj prostor boja daje bolje predviđanje pojavnosti boje od tropodražajnog prostora boja. U usporedbi sa x i y koordinatama kromatičnosti koje se mijenjaju ovisno o izvoru svjetla.





*Slika 7. CIE 1976  $L^*a^*b^*$  prostora boja s prikazom različitih područja sustava*

Nelinearna transformacija iz tropodražajnog u CIE  $L^*a^*b^*$  prostor boja omogućava da geometrijska udaljenost između dvije točke bolje predviđa vizualnu razliku boja između dva podražaja koje predstavljaju te dvije točke. Tako je razvijena kolorimetrijska razlika kao mjera za vizualnu razliku pojavnosti boja:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (10)$$

$\Delta L^*$  predstavlja razliku u svjetlini između dva podražaja, a  $\Delta b^*$  i  $\Delta a^*$  predstavlja razliku u kromatičnosti između dva podražaja. Iako je CIE  $L^*a^*b^*$  percepcijski više uniforman nego XYZ prostor boja, i dalje nije potpuno uniforman. Iz ovog razloga nije moguće postaviti jedan prag tolerancije za  $\Delta E_{ab}^*$  kroz cijeli prostor boja.

## **2.3. Metode mjerenja kolorimetrijskih vrijednosti**

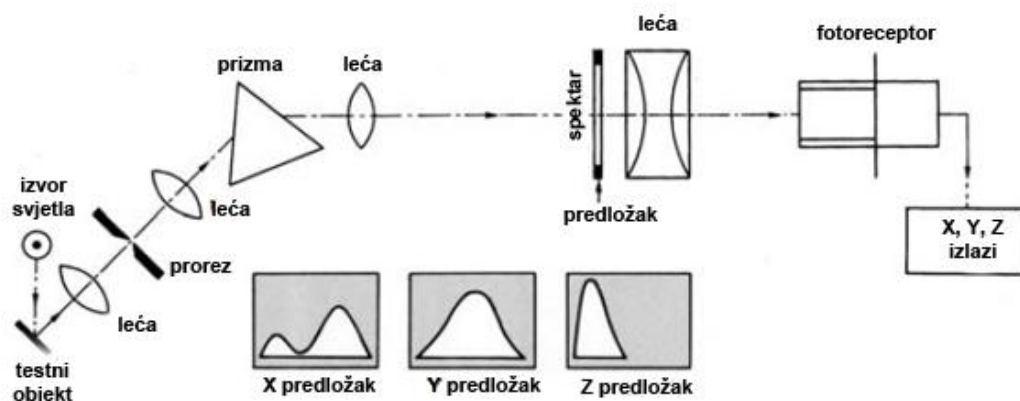
Mjerenje boja se temelji na CIE kolorimetrijskom sustavu. Instrumenti koji se koriste za mjerenja su kolorimetri, spektrofotometri te sprektoradiometri. Dobivene vrijednosti kao što su tropodražajne vrijednosti, koordinate kromatičnosti te ostale, poznate su i kao kolorimetrijske vrijednosti. Metode koje se koriste za mjerenje kolorimetrijskih vrijednosti mogu se svrstati u tri kategorije: izravna mjerenja tropodražajnih vrijednosti, spektralna mjerenja te kategorija koja uključuje vizualno podudaranje boje u vizualnom kolorimetru, no najmanje se koristi zbog toga što rezultati uvelike ovise o promatračima. [2]

### **2.3.1. Izravna mjerenja tropodražajnih vrijednosti**

Izravna mjerenja tropodražajnih vrijednosti obuhvaćaju iščitavanje kolorimetrijskih vrijednosti izravno s izlaza fotoelektričnih fotoreceptora koji zadovoljavaju stanje poznato kao Lutherovo stanje. Lutherov uvjet je zadovoljen ako je spektralna osjetljivost kamere linearno povezana s ljudskim podražajem boja.

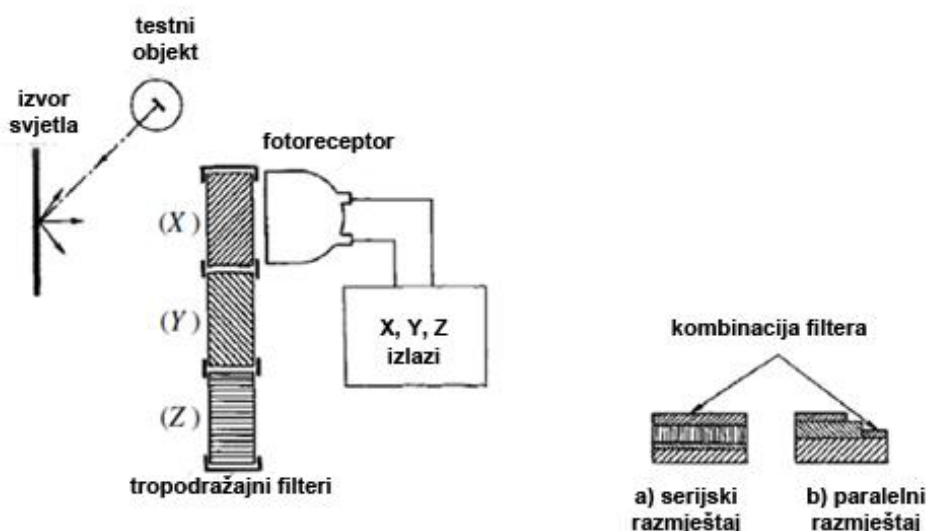
Instrument s tri kanala (svaki za jednu funkciju usklađivanja boja) koji se koristi za mjerenja je fotoelektrični kolorimetar. Lutherovo stanje može se ostvariti pomoću dvije metode [1,2]:

1. „Template“ metoda ili metoda predloška - u ovoj metodi Lutherovo stanje se realizira koristeći predložak postavljen u spektru. Slika 8. prikazuje optički sustav za primjenu ove metode u kolorimetriji reflektirajućeg objekta. Zračenje koje reflektira testni objekt prolazi kroz prizmu te se raspršuje u spektru. Tri predloška, X, Y i Z predložak se stavljaju jedan po jedan tijekom vremena u spektar. Metoda predloška nije raširena zato što je dosta komplicirana i skupa za konstrukciju.



Slika 8. Shematski dijagram predloška fotoelektričnog kolorimetra

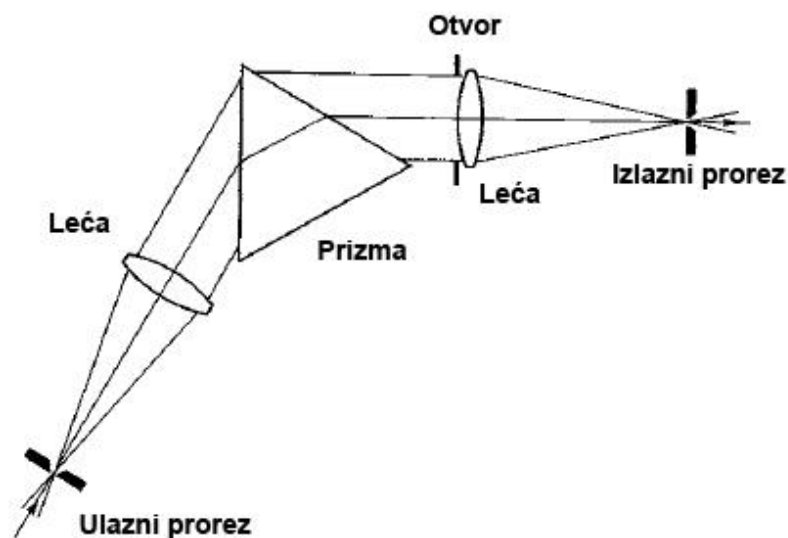
- Metoda optičkog filtera - u ovoj metodi Lutherovo stanje se postiže korištenjem kombinacije optičkih filtera umjesto prizme i predložaka. Optički filteri mogu biti posloženi serijski ili paralelno. Metoda optičkog filtera se dosta upotrebljava radi jednostavne strukture te relativno povoljne cijene filtera. Često se naknadna kalkulacija funkcija koristi za pretvorbu tropodražajnih vrijednosti u ostale kolorimetrijske vrijednosti kao što su  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $u^*$  i  $v^*$ . [1, 2]



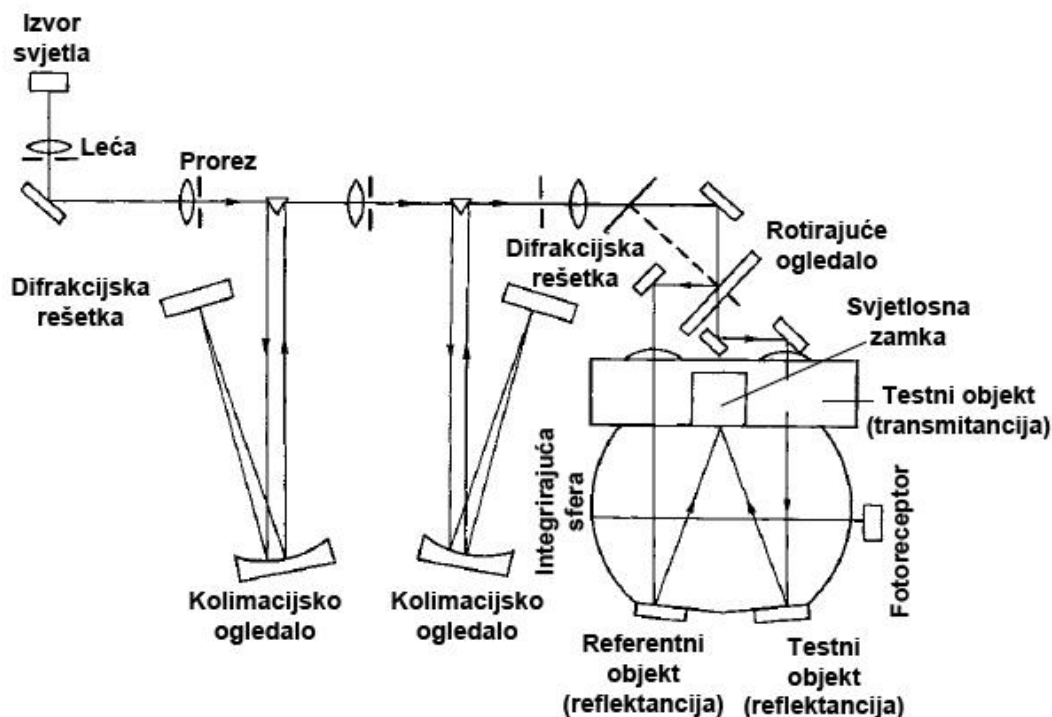
Slika 9. Shematski dijagram filtera fotoelektričnog kolorimetra

### 2.3.2. Spektralna kolorimetrija

Spektralna kolorimetrija je metoda pomoću kojih su kolorimetrijske vrijednosti dobivene kalkulacijom izmjerene spektralne raspodjele izvora ili spektralne refleksije (ili transmisije) objekta [1,2]. Mjerenja se rade pomoću spektroradiometra (za izvore) ili spektrofotometra (za reflektirajuće ili transmitirajuće objekte). Oba instrumenta koriste monokromator za raspršivanje polikromatskog zračenja („bijelo svjetlo“) u monokromatske komponente te fotoreceptora koji mjere količinu zračenja svake valne duljine. Kao monokromator može poslužiti prizma (*slika 10.*) ili češće, difrakcijska rešetka (*slika 11.*)



*Slika 10. Prikaz principa prizme kao monokromatora*



Slika 11. Optički sustav praktičnog spektrofotometra

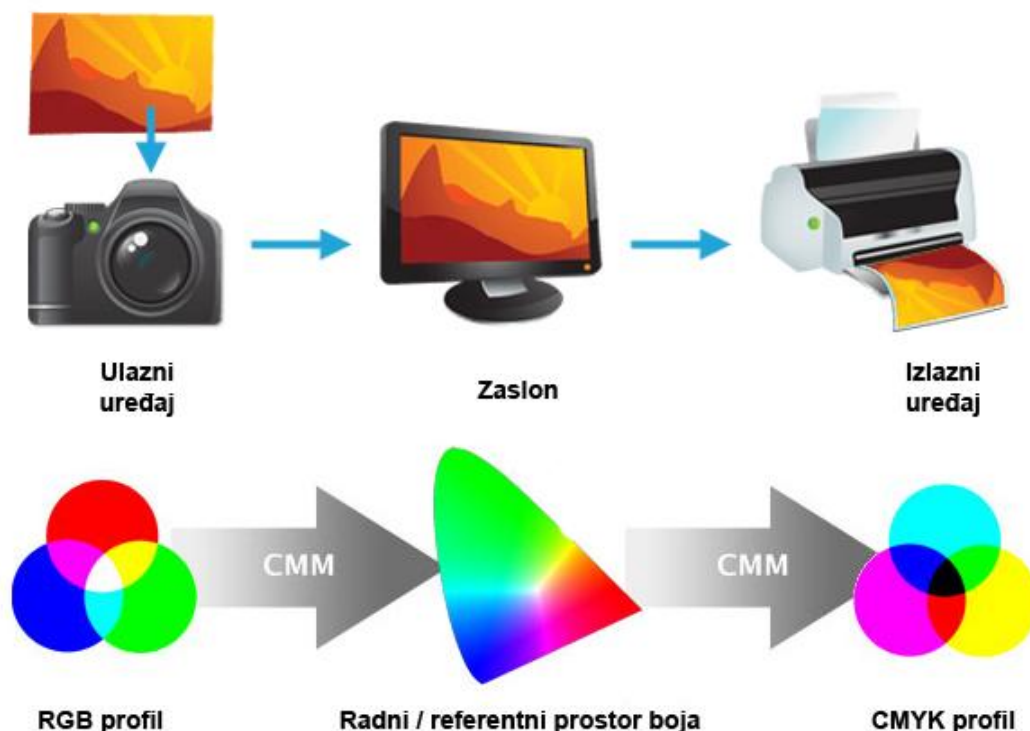
## 2.4. Upravljanje bojama

Upravljanje bojama (eng. *Color management*) je proces kontrolirane konverzije između prikaza boja na različitim uređajima, kao što su skeneri, digitalne kamere, zasloni, printeri i ostali. Primarni cilj upravljanja bojama je postizanje istog prikaza boja na svim uređajima, pod uvjetom da su uređaji u stanju prikazati potreban intenzitet boje. [4,5]

Da bi sustav upravljanja bojama bio adekvatan za uporabu, mora proći nekoliko faza:

1. Karakterizacija – svaki uređaj za upravljanje bojama zahtjeva personaliziranu tablicu („profil boja“) koji karakterizira odgovor boje na tom uređaju
2. Standardizacija – svaki profil boja opisuje boje relativno u odnosu na standardizirani set referentnih boja (*Profile Connection Space*)

3. Translacija – software za upravljanje bojama pomoću standardiziranih profila translata boju s jednog uređaja na drugi. To obično obavlja modul za upravljanje bojama (*Color Management Module*)



Slika 12. Primjer upravljanja bojama

Sustav za upravljanje bojama je standardizirao internacionalni konzorcij boja ( eng. *International Color Consortium*, ICC), te se upotrebljava na većini računala. Sadrži nekoliko ključnih pojmova: profil boja, prostor boja i translacije između prostora boja. Prostor boja opisuje skup svih provedivih kombinacija boja. Prostori boja su vrlo korisni alati za razumijevanje kompatibilnosti boja između dva različita uređaja. [4]

## 2.5. PLVC model u ispitivanju karakterizacije boje zaslona

PLVC model (*Piecewise Linear Model Assumming Variation in Chromaticity*) su prvi put predstavili Farley and Gutmann 1980. godine. Ovaj model ne uzima u obzir međuovisnost kanala, ali uzima u obzir pomak kromatičnosti primara [6]. Poznavajući tropodražajne vrijednosti X, Y i Z za

svaki primar kao funkciju digitalnog ulaznog signala, uz pretpostavku aditivnosti, rezultirajuća boja tropodražajnih vrijednosti može se izraziti kao zbroj tropodražajnih vrijednosti za svaku pojedinu komponentu, odnosno primar, na danoj razini ulaznog signala. Treba imati na umu da s obzirom na to da se nekoliko puta ne dodaje nivo crne boje, uklanja se iz svih korištenih mjerenja za definiranje modela [6]. Zatim, on se dodaje na rezultat, da ispravi prostor boja standardnog promatrača.

Za broj primara  $N$ , digitalnih ulaznih signala za  $i$  primara,  $d_i(m_i)$ , gdje je  $i$  cijeli broj u skupu  $\in [0, N]$  te  $m_i$  cijeli broj koji je ograničen rezolucijom uređaja (npr.  $m_i \in [0, 255]$  za kanal kodiran na 8 bitova), boja  $XYZ(..., d_i(m_i), ...)$  može se izraziti kao:

$$\begin{aligned} X(..., d_i(m_i), ...) &= \sum_{j=0, j \neq m_i}^{i=N-1} [X(d_i(j)) - X_k] + X_k \\ Y(..., d_i(m_i), ...) &= \sum_{j=0, j \neq m_i}^{i=N-1} [Y(d_i(j)) - Y_k] + Y_k \\ Z(..., d_i(m_i), ...) &= \sum_{j=0, j \neq m_i}^{i=N-1} [Z(d_i(j)) - Z_k] + Z_k \end{aligned} \quad (11)$$

To se može primjerice primijeniti za tri primara RGB uređaja, sa svakim kanalom kodiranim na 8 bitova. Digitalni ulazi su  $d_r(i)$ ,  $d_g(j)$ ,  $d_b(l)$ , gdje su  $i$ ,  $l$  i  $j$  cijeli brojevi elementi skupa  $\in [0, 255]$ . Tada jednačba glasi ovako:

$$\begin{aligned} X(d_r(i), d_g(j), d_b(l)) &= [X(d_r(i)) - X_k] + [X(d_g(j)) - X_k] + [X(d_b(l)) - X_k] + X_k \\ Y(d_r(i), d_g(j), d_b(l)) &= [Y(d_r(i)) - Y_k] + [Y(d_g(j)) - Y_k] + [Y(d_b(l)) - Y_k] + Y_k \\ Z(d_r(i), d_g(j), d_b(l)) &= [Z(d_r(i)) - Z_k] + [Z(d_g(j)) - Z_k] + [Z(d_b(l)) - Z_k] + Z_k \end{aligned} \quad (12)$$

Prethodne studije i ispitivanja PLVC modela daju dobre rezultate, posebice za tamne i srednje-svijetle boje. Post i Calhoun su tvrdili kako je greška u kromatičnosti manja kod PLVC modela nego kod PLCC modela pri niskoj svjetlini [6].

Prethodna ispitivanja ovog modela su pokazala dobre rezultate za tamne i srednje osvijetljene boje. Kada boje dosegnu višu osvijetljenost, pretpostavka aditivnosti manje vrijedi za CRT tehnologije te se tada točnost smanjuje (ovisno o svojstvima uređaja). Post i Calhoun su tvrdili da je greška u kromatičnosti manja kod PLVC modela u odnosu na PLCC model pri niskoj osvijetljenosti, zbog postavljanja kromatičnosti primara na maksimalni intenzitet kod PLCC modela [6]. Oba modela prikazuju manjak preciznosti pri visokoj osvijetljenosti boja s obzirom na međuovisnost kanala.

## 2.6. PLCC model u ispitivanju karakterizacije boje zaslona

PLCC model (*Piecewise Linear model assuming Chromaticity Constancy*) je model za karakterizaciju boja zaslona koji pretpostavlja konstantnu kromatičnost, odnosno, upotrebljava se za mjerenja CRT tehnologije zaslona. Koristi se za brzu procjenu informacija o boji jer koristi relativno jednostavne algoritme koji obavljaju mali broj mjerenja [7].

PLCC model procjenjuje funkciju optoelektroničnog prijenosa na zaslonu, koristeći skup funkcija izraženih u sljedećoj jednadžbi:

$$\underline{R} = f_R(D_R) \quad \underline{G} = f_G(D_G) \quad \underline{B} = f_B(D_B) \quad (13)$$

$f_R$ ,  $f_G$ , i  $f_B$  predstavljaju funkcije optoelektroničnog prijenosa za crvenu, zelenu i plavu primarnu boju, a  $D_R$ ,  $D_G$  i  $D_B$  su normalizirane crvene, zelene i plave digitalne ulazne vrijednosti [8]. Optoelektronička funkcija  $f$  je aproksimirana djelomičnom linearnom interpolacijom između mjerenja. Kolorimetrijska transformacija u XYZ tropodražajne vrijednosti vidljiva je u jednadžbi

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XR_{max} & XG_{max} & XB_{max} \\ YR_{max} & YG_{max} & YB_{max} \\ ZR_{max} & ZG_{max} & ZB_{max} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{R} \\ \underline{G} \\ \underline{B} \end{bmatrix} \quad (14)$$



$XR_{max}$ ,  $YR_{max}$ , i  $ZR_{max}$  su tropodražajne vrijednosti primara crvene boje kada je digitalna ulazna vrijednost crvene boje maksimalna, slično tome  $XG_{max}$ ,  $YG_{max}$ , i  $ZG_{max}$  su za zelenu boju, a  $XB_{max}$ ,  $YB_{max}$ , i  $ZB_{max}$  za plavu boju.  $R$ ,  $G$  i  $B$  predstavljaju optoelektroničke funkcije zaslona. Ove jednadžbe i pretpostavke se smatraju prihvatljivim za CRT tehnologije [8].

## 2.7. Standardi mjerenja zaslona

Mjerenje zaslona često je bilo nekonzistentno te loše standardizirano u mnogim slučajevima te nije posve sigurno da li je definicija svojstava zaslona korektna, realna ili dosljedna. Često se tražio idealan standard za određeni set mjerenja za zaslone, no nisu se pronalazili dokumenti koji bi služili toj svrsi [9].

To se promijenilo izdavanjem *Flat Panel Display Measurement* (FPDM), standarda za mjerenje zaslona koji je objavio *Video Electronics Standards Association*. Izdan je te naknadno ažuriran u FPDM2, 2001. godine. Koristio ga je velik broj korisnika, no sredinom desetljeća FPDM je za novije tehnologije zaslona pokazivao nekompatibilnost. ICDM (*International Committee for Display Metrology*) je Međunarodni odbor za mjeriteljstvo zaslona, ista grupa koja je napisala FPDM, napisala *Information Display Measurement Standard* (IDMS), odnosno standard za mjerenje zaslona. Često, standardi za evaluaciju zaslona se prodaju po visokim cijenama te mogu sadržavati samo osnovni sadržaj ili nekoliko mjerenja.

IDMS je dokument za standardne postupke mjerenja za kvantifikaciju elektroničkih karakteristika i kvalitete zaslona [9,10]. Da bi se promicale i koristile procedure i tehnike mjerenja zaslona, elektronska verzija IDMS-a je potpuno dostupna i besplatna. IDMS ima sljedeće karakteristike:

- Samostalni postupci mjerenja koji su jasni i jednostavni za korištenje
- Knjižnica najčešće korištenih i novo razvijenih mjerenja zaslona te deseci novih mjerenja za trenutne i buduće vrste zaslona
- Prilagodljivost – omogućuje korištenje razne opreme za mjerenja
- Dijagnostika, upozorenja, tutorijali te razne dodatne karakteristike

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog rada postepeno će se obrazložiti tijek ispitivanja i postupci ispitivanja za izradu ovog rada.

#### 3.1. Materijali

Ispitivanje se vršilo na tri različita uređaja: mobilni uređaji Apple iPhone 4, Samsung Galaxy SIII te tablet Apple iPad 4. Na svakom uređaju svjetlina zaslona bila je podešena na maksimalnu vrijednost.

##### 3.1.1. Apple iPhone 4

iPhone 4 je pametni mobilni uređaj proizvođača Apple. Ima 3.5" (89mm) IPS-LCD („Retina“) zaslon, rezolucije 960 x 640 piksela te maksimalne 500 cd/m<sup>2</sup> svjetline. Na njegovom zaslonu su se mjerile  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , X, Y i Z vrijednosti pomoću kolorimetra pri maksimalnoj svjetlini zaslona.



*Slika 14. Pametni mobitel Apple iPhone 4*

##### 3.1.2. Samsung Galaxy SIII

Samsung Galaxy SIII je pametni mobilni uređaj, zaslona od 4.8" (120 mm), vrsta zaslona je HD SUPER AMOLED, rezolucije 720 x 1280 piksela, maksimalne svjetline zaslona od 224 cd/m<sup>2</sup>. Na njegovom zaslonu su se mjerile  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , X, Y i Z vrijednosti pomoću kolorimetra pri maksimalnoj svjetlini zaslona.



*Slika 15. Pametni mobitel Samsung Galaxy SIII*

### **3.1.3. Apple iPad 4**

Apple iPad 4 je tablet, zaslona od 9.7" (246.38 mm), vrsta zaslona je IPS-LCD, rezolucije 1536 x 2048 piksela, maksimalne svjetline zaslona od 476 cd/m<sup>2</sup>. Na njegovom zaslonu su se mjerile  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  vrijednosti pomoću kolorimetra pri maksimalnoj svjetlini zaslona.



*Slika 16. Tablet Apple iPad 4*

## **3.2. Instrumenti**

### **3.2.1. Kolorimetar Konica Minolta CS-200**

Konica Minolta CS-200 kolorimetar je uređaj pomoću kojeg se osim kromatičnosti, može mjeriti i svjetlina izvora svjetla, s velikom preciznošću i brzinom. Može mjeriti bilo koji izvor svjetla nivoa osvjetljenosti od 0.01 cd/m<sup>2</sup> do 20,000,000 cd/m<sup>2</sup>. Korišten je za mjerenje  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  vrijednosti zaslona uređaja za različite uzorke boja.



*Slika 13. Konica Minolta CS-200 kolorimetar*

### **3.3. Metode**

Ispitivanje se vršilo u praktikumu na 3. katu Grafičkog fakulteta u Zagrebu. Prostorija je bila zamračena zbog toga da dnevno svjetlo ne utječe na dobivene rezultate. Za mjerenje se koristio kolorimetar Konica Minolta CS-200 uz koji dolazi program CS-S10W.

U programu se prije početka mjerenja podešavaju određeni parametri, kao što su vrijednosti koje se žele dobiti mjerenjem ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) kut promatrača od  $1^\circ$  te vrijeme mjerenja. Potom se kolorimetar postavlja na visinu sredine zaslona, udaljenosti 30 cm od zaslona te fokusa od 0.3 m (da slika bude mutna, odnosno da se ne vide granice između piksela). Na uređajima kojima se radi mjerenje, podešava se svjetlina zaslona na maksimalnu te se učitava web skripta. Web skripta pisana u HTML-u prikazuje 729 različitih uzoraka boja koje se mijenjaju na zaslonu uređaja, a pritom kolorimetar snima te bilježi tražene vrijednosti za svaku boju. Mjerenje počinje istovremeno kada se pokrene web skripta.

Po završetku mjerenja na računalu se pohrane dobivene vrijednosti koje se kasnije koriste za usporedbu PLCC, PLCC\* s crnom korekcijom i PLVC modelom aproksimiranih vrijednosti te izmjerenih vrijednosti.

#### 4. REZULTATI I RASPRAVA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati mjerenja i izračuna te objašnjenja istih. Kao što je u prethodnom poglavlju navedeno, mjerenja su se izvodila na 3 uređaja: Apple iPhone 4, Samsung Galaxy SIII i Apple iPad 4. Nakon mjerenja, dobivene rezultate je trebalo obraditi.

Prvo su se radili izračuni za PLCC model. Uzeto je 10 nasumičnih boja te je za svaku boju izračunata kolorimetrijska razlika, srednja vrijednosti, medijan, standardna devijacija, minimalna i maksimalna vrijednost. Za izračune su korišteni programi MatLAB i Excel.

Za PLCC \* model s crnom korekcijom te za PLVC model se također uzima istih 10 boja kao i za PLCC model te se računa za svaku boju kolorimetrijska razlika, srednja vrijednosti, medijan, standardna devijacija, minimalna i maksimalna vrijednost [11].

*Tablica 1. Prikaz RGB vrijednosti 10 odabranih boja*

BOJA	R	G	B
12	64	32	0
30	64	96	0
79	192	255	0
114	160	96	32
223	192	192	64
301	96	192	96
442	0	128	160
563	128	255	192
627	160	192	224
710	224	192	255

Tablica 2. Rezultati dobiveni izračunima za PLCC, PLCC\* i PLVC modele za odabrane uređaje

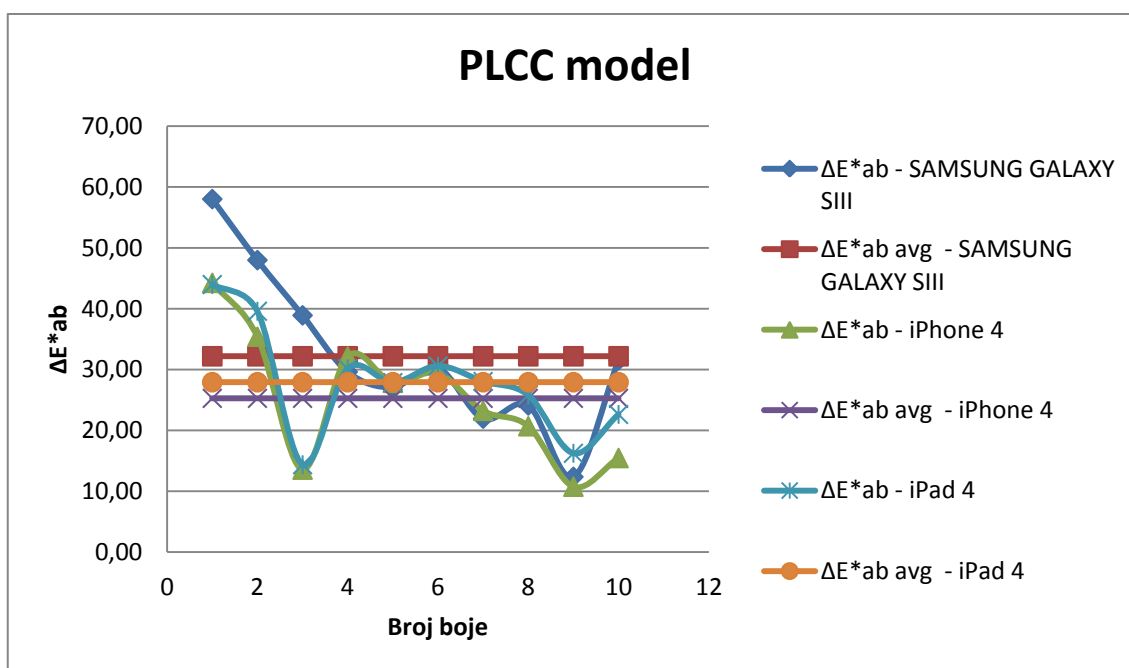
10 nasumičnih boja		$\Delta E^*ab$ avg	$\Delta E^*ab$ median	$\Delta E^*ab$ std.dev.	$\Delta E^*ab$ min	$\Delta E^*ab$ max
Samsung Galaxy SIII	PLCC	32,19	29,94	13,17	12,37	58,02
	PLCC*	29,17	27,95	10,01	12,37	48,34
	PLVC	34,98	32,53	19,39	7,24	70,45
iPhone 4	PLCC	25,28	25,52	10,56	10,76	44,26
	PLCC*	24,52	24,91	9,67	11,39	40,15
	PLVC	4,96	4,79	3,43	1,57	13,24
iPad 4	PLCC	27,93	27,95	9,18	14,38	43,98
	PLCC*	28,42	26,09	11,36	15,19	54,06
	PLVC	3,98	2,75	4,01	1,21	14,85

$\Delta E^*ab$  avg označava srednju vrijednost,  $\Delta E^*ab$  median označava median,  $\Delta E^*ab$  std.dev. označava standardnu devijaciju,  $\Delta E^*ab$  min označava minimalnu vrijednost,  $\Delta E^*ab$  max označava maksimalnu vrijednost  $\Delta E^*ab$  kolorimetrijske razlike dobivene za 10 odabranih boja.

Na temelju dobivenih rezultata može se iščitati kako pri izračunima za PLCC model ispadaju jako velika odstupanja od mjerenih vrijednosti, odnosno kolorimetrijska razlika  $\Delta E^*ab$  je najveća. PLCC\* model s crnom korekcijom pokazuje nešto bolje rezultate u odnosu na PLCC model, no i dalje je kolorimetrijska razlika velika za sve uređaje. Tek bolji rezultati dobiveni su korištenjem PLVC modela, koji prikazuje najmanju kolorimetrijsku razliku, no ne i za sve uređaje.

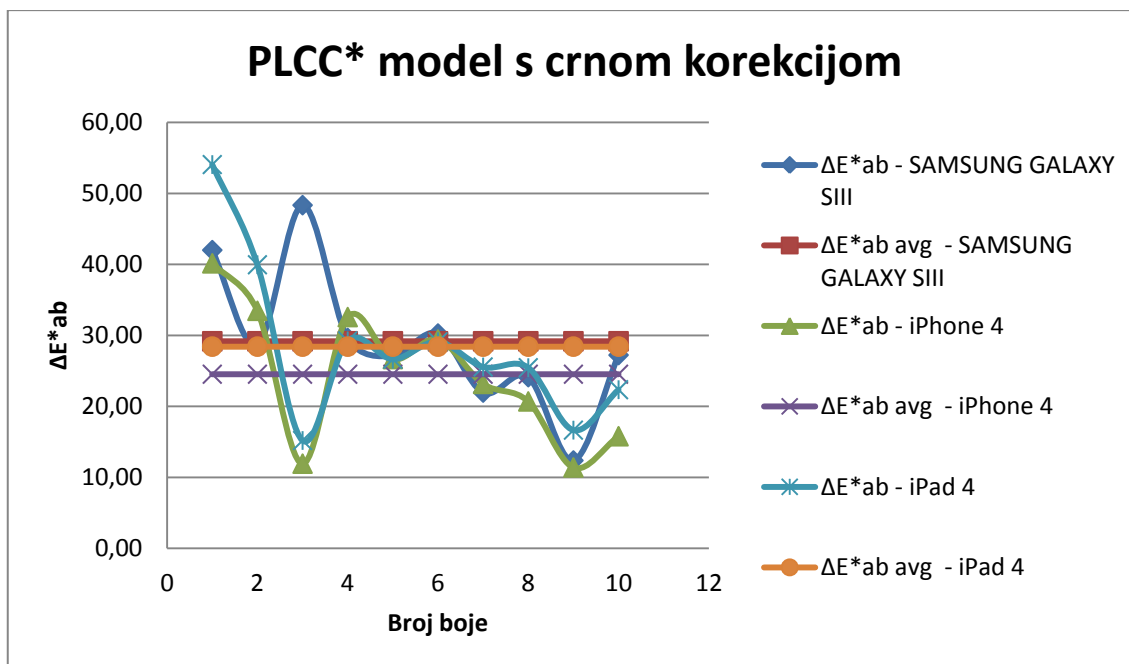
Vidljivo je odstupanje kod uređaja Samsung Galaxy SIII koji čak najveću kolorimetrijsku razliku ima kod PLVC modela. Naravno, na same rezultate ima utjecaj i tehničke specifikacije samih uređaja. Kao što je u prethodnom poglavlju navedeno, uređaj Samsung Galaxy SIII ima maksimalnu svjetlinu zaslona od 224 cd/m<sup>2</sup>. S obzirom da su mjerenja vršena pri maksimalnoj svjetlini zaslona, očigledno je da dosta niska svjetlina zaslona kao što je u slučaju kod uređaja Samsung Galaxy SIII ima utjecaj na dobivene rezultate za PLVC model, u odnosu na iPhone 4 koji ima maksimalnu svjetlinu zaslona od 500 cd/m<sup>2</sup> ili iPad 4 maksimalne svjetline zaslona od 476 cd/m<sup>2</sup>.

Također, Samsung Galaxy SIII ima tehnologiju zaslona HD SUPER AMOLED dok iPhone 4 ima IPS-LCD („Retina“ zaslon), kao i iPad 4, što također može imati utjecaja na dobivene rezultate. IPS je kratica za *in-plane switching*. IPS-LCD je vrsta tankih zaslona koja nudi bolje kutove gledanja od TFT-LCD-a. IPS-LCD zasloni imaju dva tranzistora za svaki piksel, gdje TFT-LCD zasloni koriste samo jedan. To zahtijeva snažnije pozadinsko osvjetljenje, koje donosi precizniji prikaz boja, a omogućuje da se zaslon može vidjeti iz šireg kuta. Negativno je to što IPS-LCD zasloni troše puno više energije. Super AMOLED zaslon je verzija AMOLED(*Active Matrix Organic Light-Emitting Diode*) tehnologije za prikaz koji integrira kapacitivni touchscreen sloj izravno u zaslon. To rezultira tanjim dizajnom koji koristi manje energije i reflektira manje svjetla, a kao rezultat toga radi bolje na otvorenom.



Grafikon 1. Prikaz kolorimetrijske razlike i srednje vrijednosti za sve uređaje za PLCC model

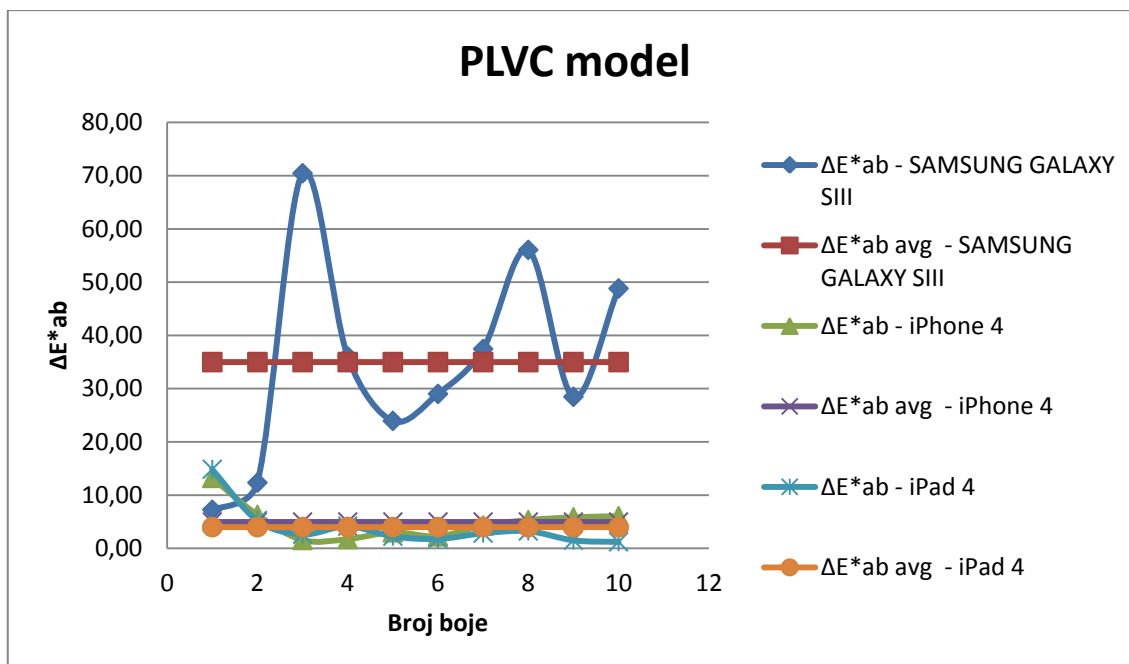
Kao što je predviđeno, PLCC model daje najveća odstupanja od mjerenih vrijednosti (grafikon 1) upravo zato što je taj model predviđen za CRT tehnologije zaslona.



*Grafikon 2. Prikaz kolorimetrijske razlike i srednje vrijednosti za sve uređaje za PLCC\* model s crnom korekcijom*

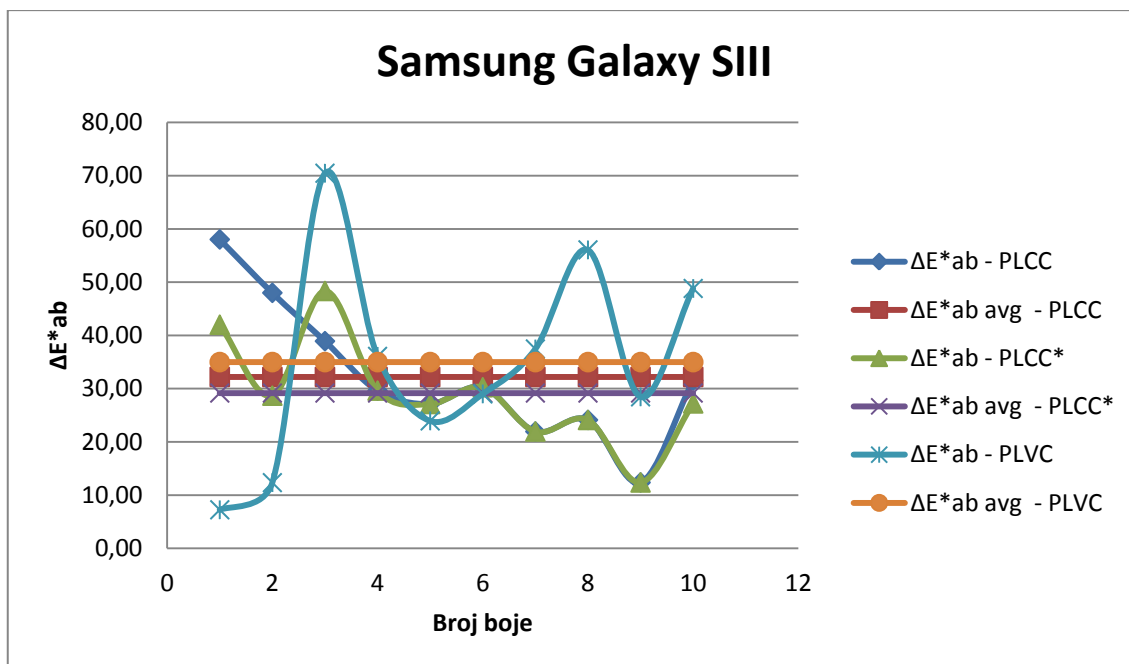
PLCC model zbrajanjem vrijednosti sva tri primara pribraja doprinos crne tri puta (za svaki primar pojedinačno). Stoga se provodi korekcija crne boje na način da je potrebno oduzeti doprinos crne dva puta, na taj način model može ispravo uzeti doprinos crne samo jednom. Tada dobivamo model PLCC\* s crnom korekcijom. Vrijednosti za PLCC\* model odstupaju nešto danje u odnosu na PLCC model, no i dalje je kolorimetrijska razlika vrlo velika te i PLCC\* model nije pogodan za ispitivanje tehnologije zaslona pri visokoj osvjetljenosti kao što je vidljivo na grafikonu 2.



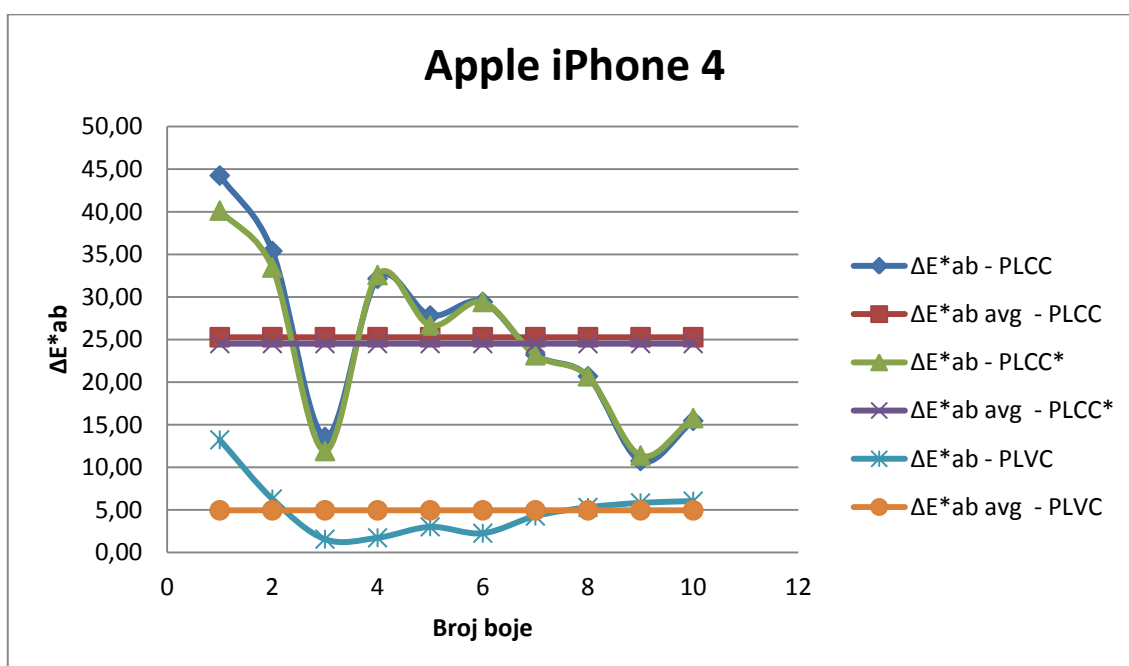


*Grafikon 3. Prikaz kolorimetrijske razlike i srednje vrijednosti za sve uređaje za PLVC model*

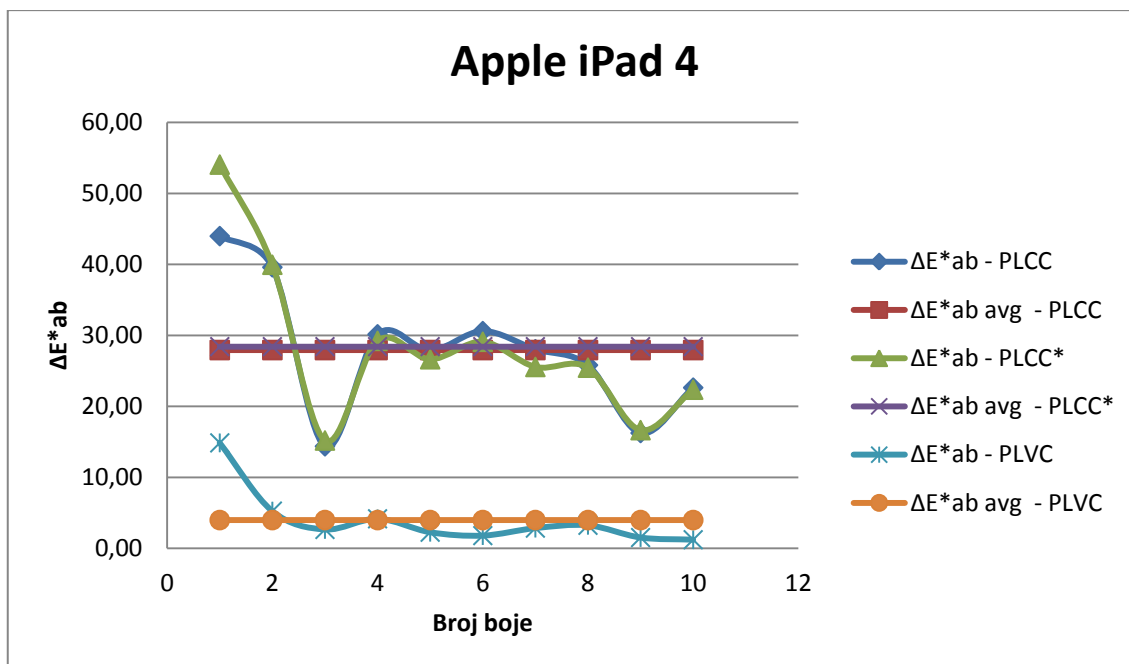
Kod Super AMOLED tehnologije boje su nešto zasićenije, dok su kod IPS-LCD zaslona prirodniji prikazi boja, tako da je i kod PLVC modela vidljivo na grafikonu 3 odstupanje od mjerenih vrijednosti kada uspoređujemo tehnologije zaslona Super AMOLED( Samsung Galaxy SIII) i IPS-LCD (iPhone 4 i iPad 4). Samsung Galaxy SIII prikazuje najveće odstupanje za PLVC model i radi toga što je njegova maksimalna svjetlina zaslona 224 cd/m<sup>2</sup>, što je dosta niska svjetlina zaslona pa rezultati dobiveni modelom odstupaju dosta od izmjerenih vrijednosti. Mala odstupanja su vidljiva kod uređaja iPhone 4 i iPad 4



Grafikon 4. Prikaz kolorimetrijske razlike i srednje vrijednosti za sve modele za Samsung Galaxy SIII



Grafikon 5. Prikaz kolorimetrijske razlike i srednje vrijednosti za sve modele za iPhone 4



Grafikon 6. Prikaz kolorimetrijske razlike i srednje vrijednosti za sve modele za iPad4

Na grafikonu 4 je prikazano kakva je kolorimetrijska razlika PLCC, PLCC\* i PLVC modela kod uređaja Samsung Galaxy SIII, te je vidljivo da nijedan od navedenih modela ne predviđa ispravan prikaz boja.

Na grafikonu 5 za uređaj iPhone 4 prikazani su najbolji rezultati korištenjem PLVC modela, dok su za PLCC i PLCC\* model prikazana podjednako velika odstupanja.

Grafikon 6 za uređaj iPad 4 prikazuje najbolje rezultate za PLVC model, a za PLCC i PLCC\* model su podjednako velike vrijednosti kolorimetrijske razlike.

## 5. ZAKLJUČCI

Kao što je pretpostavljeno hipotezom, PLVC model prikazuje dobru aproksimaciju izračuna za karakterizaciju boja za novije tehnologije zaslona kao što je LCD zaslon, u odnosu na PLCC i PLCC\* model s crnom korekcijom koji se pretežito koriste za CRT tehnologije zaslona. No, iako je PLVC model dobro primjenjiv za LCD zaslone, za AMOLED zaslon ne prikazuje točne rezultate, vjerojatno zašto što AMOLED zasloni prikazuju boje s višim stupnjem zasićenja, ali i emitira manje svjetla te je kod ispitivanog uređaja sa Super AMOLED tehnologijom zaslona svjetlina zaslona niska. PLVC model očigledno najbolje rezultate pokazuje kod LCD zaslona pri visokoj osvjetljenosti zaslona od oko  $500 \text{ cd/m}^2$ .

Bilo je očekivano kako će PLCC i PLCC\*model s crnom korekcijom prikazivati rezultate s velikim odstupanjima radi toga jer su ti modeli bili korišteni kod starijih tehnologija zaslona gdje se pretpostavljala konstanta u kromatičnosti kanala boja, no neovisno o tome, rezultati dobiveni izračunima u ovome radu su još veći od očekivanog. Tome je pridonijelo to što je bila visoka svjetlina zaslona uređaja, a PLCC model najbolje rezultate daje pri niskoj osvjetljenosti zaslona.

S obzirom da se tehnologije zaslona i dalje mijenjaju, sukladno tome se mijenjaju i izračuni i modeli koji će što bolje predviđati prikaz i karakterizaciju boje, te da boja ostane podjednako prikazana neovisno o tome na kakvom se izlaznom uređaju prikazuje.

## 6. LITERATURA

- [1] Wyszecki G., Stiles W.S. (2000). *Color Science*, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Ohta N., Robertson A.R. (2005). *Colorimetry fundamentals and applications*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester
- [3] CIE, *Colorimetry*, CIE 15:2004, Commission Internationale de l'Eclairage, Vienna, 2004a.
- [4] McHugh S., *Overview of color management*, dostupno na <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/color-management1.htm>, 12.07.2016.
- [5] Fernandez-Maloigne C. (2013). *Advanced Color Image Processing and Analysis*, Springer, New York
- [6] Thomas J.B., Hardeberg J.Y., Foucherot I., Gouton P. (2008). *The PLVC display color characterization model revisited*, Vol. 33, No. 6, (Prosinac 2008) broj stranica (449-460)
- [7] Jimenez Del Barco L., Daz J.A., Jimenez J.R., Rubino M.(1995). *Considerations on the calibration of color displays assuming constant channel chromaticity*, Vol. 20, No. 6, (Prosinac 1995) broj stranica (377-387)
- [8] Kim J.M., Lee S.W. (2015). *Universal color characterization model for all types of displays*, Vol. 54, No. 10, (Listopad 2015) broj stranica (377-387)
- [9] Miseli J. (2012). *An introduction to the Information Display Measurement Standard 1, the first display measurement standard from the International Committee for Display Metrology*, Vol. 21, No. 6, (Lipanj 2013) broj stranica (103103-1 – 103103-6)
- [10] <http://www.sid.org/Publications/ICDM.aspx>, 02.07.2016.
- [11] Westland, S. ,Ripamonti, C. (2004). *Computational Colour Science Using MATLAB*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester